

接触网受流质量综合评价手段的研究

梅志红

王冰容

邓文华

(电子信息工程系)

(电气工程系)

(经济管理学系)

摘 要 通过剖析影响高速受流的本质因素,分析了受流的评判标准^[13]以模糊理论为基础,提出了对接触网受流质量进行综合评价的数学模型^[13]阐述了评价过程的三要素,即系统的观点、模糊数学的方法及计算机应用^[13]

关键词 受流质量;隶属度;隶属函数;模糊理论

分类号 TM 922.5

0 引 言

目前,我国已将发展高速铁路的计划提到了议事日程,但是我国发展高速电气化铁道急需解决许多问题,其中接触网面临着诸如:如何评价接触网悬挂受流质量,如何确定接触网悬挂评判标准等问题^[13]

研究高速接触网受流性能必须通过一定评判手段才能优选出最佳方案^[13]如何评价一种悬挂类型,这个问题是个综合性的复杂问题,各个国家根据本国的国情,有各自考虑问题的角度和方法^[13]本文将以系统的观点来研讨这个问题^[13]

实际上从系统的观点来看,对受流的评价我们建议分以下几个步骤来进行^[13]首先分析国内外各种接触网挂型式及接触网悬挂方案的有关技术,从而建立适合我国国情的弓网关系的物理模型和数学模型;然后进行计算机动态仿真模拟,找出影响高速受流的本质因素;通过对计算机动态仿真模拟结果的分析,结合试验室比例模拟和现场实验,并参考国外接触网悬挂评判标准的研究,制定出适合我国国情的接触网悬挂评判标准;以已制定的接触网悬挂评判标准为基础,建立影响受流的各个因素的隶属函数,采用模糊评判的手段对任意一种接触网悬挂受流质量进行综合评价^[13]所有这些过程都可在人的控制下用计算机来完成^[13]从而形成集设计、选优、评价于一体的设计系统^[13]

1 影响高速受流的本质因素的分析

目前的研究结果表明,影响高速受流的本质因素,主要可归纳为静态弹性、安全系数、波动传播速度、接触线寿命、离线、动态接触压力、接触线平均抬高量、定位点抬升量、受电弓归算质

量和上下位移量^[13]

(1) 静态弹性

在接触网静止状态下,对接触线由下向上施加垂直力,接触网的抬高值和垂直力之比为静态弹性^[13]一般可由弹性不均匀度、平均弹性、定位点静态弹性来描述^[13]弹性不均匀度 u 越小越有利于改善弓网关系;平均弹性越小,接触网越稳定;为了减少刮弓的可能性,要减少定位器抬高量^[13]但计算机模拟弓网关系的计算结果发现,一味加大承力索张力,降低接触网的平均弹性,效果不一定好,必须进行具体分析^[13]

(2) 安全系数 K_j

$$K_j = \alpha F_{\max} / (\alpha F) \quad (13)$$

式中: α , α 分别为磨损系数和张力差系数, α 一般取 0.8 (新导线临时作检验时 α 取 1); α 一般取 1.15, 高速时为 1.1 或更小; $F_{\max}$ 为导线最大破坏拉力, N; F 为补偿器处导线额定张力, N^[13]

我国《铁路电力牵引供电设计规范》(TBJ9-85) 规定安全系数 $K_j = 2.5$, 如果两种悬挂受流性能一样, 则安全系数大者应为优选者^[13]

(3) 波动传播速度

指整个接触网的波动传播速度 V_t 、接触线波动传播速度 V_j ^[13]

提高 V_j 对提高接触网高速运营速度产生更直接的影响^[13]如果确定了接触线波动传播速度 V_j , 就能计算出接触网可以采用的运营速度的近似值: $V_{\text{运营}} = \beta V_j$

β ——接触网运营速度与接触线波动传播速度之比^[13]

如果接触悬挂确定后, β 越小, 弓网关系越好, 离线越少, 适应受电弓的能力越强^[13]波动传播速度是十分有用的评价参考值, β 的经验取值是 0.5~0.7^[13]

(4) 接触线寿命

影响接触线寿命主要有以下因素:机械磨损、电磨损、导线疲劳程度^[13]

(5) 离线

接触线和受电弓之间失去接触时, 就发生了离线^[13]离线时受电弓失去电压, 接触线与受电弓之间产生电弧, 电弧容易烧伤导线增加磨损, 最终中断运行, 同时离线产生无线电干扰^[13]

离线一般考虑以下三点:离线次数、离线时间和离线率 S , 其中离线率 S 可表示为

$$S = \frac{\sum t}{T} \times 100\% \quad (13)$$

$\sum t$ 为运行时间内各次离线时间总和, s; T 为运行时间, s^[13]

各国离线率标准不同, 一般取 2%~5%, 离线率是判断接触网质量的重要指标^[13]

(6) 动态接触压力

由于接触线和受电弓滑板之间失去接触或接触力不足就会产生电弧^[13]这个动态接触压力一般取决于受电弓静态抬升力、空气动力、垂直方向运动的质量惯性力等, 由于动态接触力分散性大, 变化幅度大, 所以引入标准偏差概念来进行一步评价^[13]

$$F_{\max} = \bar{F} + 3\delta \quad F_{\min} = \bar{F} - 3\delta \quad (13)$$

式中: $F_{\max}$ 为最大接触压力, N; $F_{\min}$ 为最小接触压力, N; $\bar{F}$ 为平均接触压力, N; δ 为标准偏差值, N^[13]

动态接触压力是评价接触网受电弓系统的最重要指标^[13]动态接触压力最小值保证在某个指标时,可保证实际运营时不离线^[13]

(7) 接触线平均抬高量越大,越容易疲劳且接触网稳定性越差^[13]

定位点允许抬高量与定位器型式有关,德国允许定位点抬高量 $\leq 200\text{ mm}$,定位点导线与定位管距离为 250 mm ^[13]

(8) 受电弓归算质量和上下位移量

受电弓归算质量和上下位移量指标是接触网对受电弓提出的要求,接触网本身参数越好,对受电弓要求越低^[13]一般来说受电弓上下位移越小,则受电弓运动轨迹越平缓,越接近于直线^[13]但如果受电弓参数一旦确定,与之相匹配的接触网和受电弓受流质量评价就应由动态接触力和疲劳度来实现^[13]

综上所述,弓网关系评判标准有八个,对八个因素赋予的权重将是不同的,哪个是最关键的标准,哪个因素赋予的权重就最大^[13]我们认为在保证受电弓正常受流的前提下,接触线寿命达200万弓架次为主要评判标准^[13]要保证导线寿命,首先要减少离线,进一步说是要保证最小接触压力应不低于某个标准值,为此最小接触压力值可作为关键评判标准^[13]在评判过程中应尽可能合理地确定各个因素的隶属函数,应尽可能合理地确定单因素评判矩阵 R ^[13]

2 综合评判的模糊数学模型

对接触网受流质量的综合评价,不仅与受流本身的诸因素有关,而且在一定的程度上与一些其它不定因素有关^[13]为了描述系统在一定程度上不精确性,在考虑众多因素的情况下,我们采用模糊数学综合评价的方法,对接触网的受流质量进行评价^[13]

综合评判的问题分两类,一类是综合评判的正问题,另一类是综合评判的逆问题^[13]

2.1 综合评判的正问题的数学模型

称映射 $T: F(X) \rightarrow F(Y), \quad A \mapsto T(A)$

为从 X 到 Y 的一个模糊变换^[13]特别,当 $|X|=n, |Y|=m$ 时,在数学上, $F(X)$ 与 $U_{1 \times n}$ 同构, $F(Y)$ 与 $U_{1 \times m}$ 同构,于是,从 X 到 Y 的模糊变换 T 又可以表示为

$$T: U_{1 \times n} \rightarrow U_{1 \times m},$$

任给 $R \in F(X \times Y)$,按下述方式可唯一确定一个从 X 到 Y 的模糊变换,记作

$$T = T_R: F(X) \rightarrow F(Y), \quad A \mapsto T_R(A) = A \circ R^{[13]}$$

其中, " $\circ$ " 表示由某种合成运算^[13]

模糊变换的直观意义可以解释为论域 X 上的模糊集到论域 Y 上的模糊集的一种转换^[13]综合评判的正问题就属于这样一种转换^[13]

综合评判正问题的数学模型 I :

已知因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 与评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ^[13]又设对各因素的权重分配为 U 上的模糊子集 A , 记为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ^[13]

其中, a_i 为第 i 个因素 u_i 所对应的权,且一般均规定

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1^{[13]}$$

对第 i 个因素的单因素评判向量为 V 上的模糊子集 $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}$ 于是单因素评判矩阵 R 为 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ (13)

则对该评判对象的模糊综合评判的结果是 V 上的模糊集 $B = A \circ R$ (13) 式中, “ $\circ$ ” 为某种合成运算 (13)

2.2 综合评判的数学模型

当因素集内容比较多时, 就要采用多级评判, 其数学模型如下 (13)

设因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 先根据因素集中因素间的关系将 U 分为 p 份, 设为 $U_i, i = 1, 2, \dots, p$, 且 $\bigcup_{i=1}^p U_i = U$ (13)

对每个 $U_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 按综合评判的数学模型 I 做综合评判, 得

$$B_i = A_i \circ R_i \quad i = 1, 2, \dots, p$$

式中, A_i 是 U_i 上的权向量, R_i 为对 U_i 的单因素评判矩阵 (13) 则

$$R = \{B_1, B_2, \dots, B_p\} \quad (13)$$

并设关于 $U_1, U_2, \dots, U_p$ 的权重分配为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$, 则得关于 U 的综合评判结果为 $B = A \circ R$

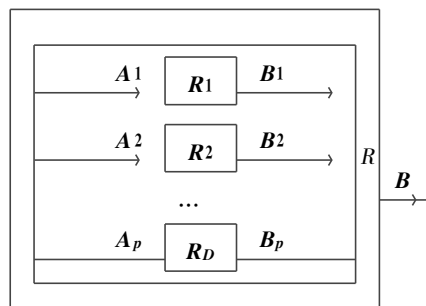


图1 二级模糊综合评判模型

综合评判的数学模型 II 称为二级模糊综合评判, 模型 I 称为一级模糊综合评判, 类似地可得到更多级的综合评判模型 (13) 二级模糊综合评判的模型见图1所示 (13)

2.3 对受流的综合评判

设各个因素集构成论域 $U: U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8\}$,

其中 U_1 为静态弹性; U_2 为安全系数; U_3 为波动传播速度; U_4 为接触线寿命; U_5 为离线; U_6 为动态接触压力; U_7 为接触线平均抬高量和定位点抬高量; U_8 为受电弓归算质量和上下位移量 (13)

对以上各个因素, 可分层进行评价, 如

(1) $U_1 = \{\text{弹性不均匀度 } \mu, \text{平均弹性 } E, \text{定位点静态弹性}\}$, 对静态弹性 U_1 这个因素的评价是以上几个因素用综合模型 I 进行综合评判的结果 (13)

(2) $U_5 = \{\text{离线次数 } n, \text{离线时间 } t, \text{离线率 } S\}$, 对离线 U_5 这个因素的评价是以上几个因素用综合模型 I 进行综合评判的结果 (13)

(3) 对动态接触压力 U_6 这个因素的评价, 当受电弓的数学模型采用二元模型时, 是对如下几个因素用综合模型 I 进行综合评判的结果 (13)

$U_6 = \{\text{最小动态接触力 } F_{\min}, \text{最大动态接触力 } F_{\max}, \text{平均接触力 } \bar{F}\}$ 等 (13)

(4) 当把安全系数、接触线寿命、离线、动态接触压力、接触线平均抬高量看成相关联时, 则可将它们分成一组, 用 U 表示, 对 U 这个因素的评价是以上几个因素用综合模型 I 进行综合评判的结果 (13)

$$U = \{U_6, U_2, U_7, U_4, U_5\}$$

评价用评语集表示, 评语集 = $\{A, B, C, D\}$ (13) 其中 A 为完全满足正常的运营要求; B 为基本

满足运营要求;C 为满足暂时运营要求;D 为不满足运营要求^[13]

为了客观的反映各个因素对受流的影响,采用加权法来评价受流质量,按论域中的各子集对受流的影响程度,分层设置相应的权重子集,如

$$U=\{U_1,U_2,U_3,U_4,U_5,U_6,U_7,U_8\},$$
$$A=\{a_{11},a_{12},a_{13},a_{14},a_{15},a_{16},a_{17},a_{18}\} \quad [13]$$

其中 $a_{11}+a_{12}+a_{13}+a_{14}+a_{15}+a_{16}+a_{17}+a_{18}=1$ ^[13]

或 $U=\{u_1,u_3,u_8,u'\}$, $A=\{a_{21},a_{22},a_{23},a_{24}\}$, 其中: $a_{21}+a_{22}+a_{23}+a_{24}=1$ ^[13]

或 $U_6=\{F_{\min},F_{\max},\bar{F}\}$, $A=\{a_{31},a_{32},a_{33}\}$ 其中: $a_{31}+a_{32}+a_{33}=1$ ^[13]

然后按数学模型Ⅱ,分层进行模糊综合评判^[13]

设对于1.7+1.3简单链形悬挂(直线段),当速度为200 km/h 时,最大动态接触压力为216 N,最小动态接触压力为93 N,标准偏差 δ 与动态接触力平均值 $\bar{F}$ 的关系为 $\bar{F}-3\delta=62N$,则可对 U_6 这个因素按综合评判模型Ⅰ进行综合评价^[13]

在采用一元受电弓模型模拟时,我们建议采用最小动态接触力作为评价标准^[13]参考的评价标准见表1^[13]从而,可得到 U 论域中 U_6 的隶属函数的选取^[13]

$A:F_{\min}>30\text{ N};\quad B:30\text{ N}>F_{\min}>20\text{ N};\quad C:20\text{ N}>F_{\min}>10\text{ N};\quad D:F_{\min}<10\text{ N}$ ^[13]

表1 动态接触力评价弓网受流质量参数标准 N

受电弓 数学模型	评判标准	弓网受流质量			
		A	B	C	D
一元模型 ¹⁾	$F_{\min}$	>30	$20\sim30$	$10\sim20$	<10
	$F_{\max}$	≥40	≥40	≥40	<40
多元模型 ²⁾	$F_{\max}$	≤200	≤250		
	δ 与 $\bar{F}$ 的关系	$\bar{F}-6\delta\geq0$	$\bar{F}-3\delta\geq40$	$\bar{F}-3\delta>0$	$\bar{F}-3\delta\leq0A^*$

1) 不含空气动力;2) 正常空气动力^[13]
说明: * 标准偏差 δ 随速度变化陡然上升^[13]

采用多元受电弓模型时,我们建议采用最小及最大动态接触力和标准偏差同时判断的方法,参考的评价标准见表1^[13]

同理在采用多元模型进行受流分析时,根据上述评价标准,我们可以得到 U_6 子集中的各子因素的隶属函数的选取^[13]

不同的专家由于职业、经验、年龄等不同,在参考各评价标准(子因素的隶属函数)的情况下,可能对介于两个评价标准附近值的评价有所不同^[13]

表2 专家评价结果

假若对 $F_{\min}$,有100%的专家对 $F_{\min}=93\text{ N}$ 的评价为 A;对于 $\bar{F}_{\max}=216\text{ N}$,有80%的专家对此的评价为 B,有20%的专家对此的评价为 A;对 $\bar{F}-3\delta\geq62\text{ N}$,有100%的专家对此的评价为 B,则总的专家评价结果可见表2所示^[13]

评价因素	评 语			
	A	B	C	D
$F_{\min}$	1.0	0.0	0.0	0.0
$F_{\max}$	0.2	0.8	0.0	0.0
$\bar{F}-3\delta$	0.0	1.0	0.0	0.0

对 $F_{\min}$ 的单因素评判向量为 $R_1=(1,0,0,0)$ ^[13]同理对 $F_{\max}$ 、 $\bar{F}-3\delta$ 的单因素评判向量分别为 $R_2=(0.2,0.8,0,0)$, $R_3=(0,1,0,0,0)$ ^[13]于是单因素评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于对这三个因素所赋予的权重可能不同,而弓网关系的评判标准有八个,哪一个是最关键的标准呢?实践表明动态接触力是评价受流的最重要的指标,因此,在这八个评价标准中,动态接触力所占的权重应是最大的^[13]而在动态接触力的评价中,动态接触力的最小值 $F_{\min}$ 是最重要的指标,动态接触力的最小值 $F_{\min}$ 保持在某个指标时,可保证导线电磨耗达到最小,从而保证运营时不离线^[13]因此,对动态接触力进行评价时,动态接触力的最小值 $F_{\min}$ 所占的权重应是最大的^[13]

设对 $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$ 、 $\bar{F} - 3\delta$ 分别赋以权数为 0.6、0.2、0.2,这时

$$A = (0.6, 0.2, 0.2),$$

因而,当“ $\circ$ ”取为“ $> - <$ ”运算时

$$B = A \circ R = (0.6, 0.2, 0.2) \circ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.6, 0.2, 0, 0) \quad (13)$$

最终评判结果应按最大隶属度的原则,以隶属度大的为评价结果,所以对 U_6 的最终评价为 A ^[13]

同理对多因素向量 U_1 、 U_5 等也可采用同样的方法,采用综合评判模型 I 进行一级评判^[13]之后,可对因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8\}$ 采用综合评判模型 II 进行二级或多级综合评判,最后评判等级,也应按最大隶属度的原则来确定^[13]

3 综合评判时,应注意的问题

(1) 因素集要选取适当,其中各个因素确实能从各个侧面描述评判对象的属性,要注意抓主要因素^[13]

(2) 合成运算“ $\circ$ ”要根据具体的问题作一定的选择不能盲目使用^[13]这里给出三种合成运算的特性,以供选择时参考^[13]

“ $\circ$ ”取为“ $> - <$ ”,称为主因素决定型,因为它的结果由指标最大者决定,其余指标在一个范围变化时均不影响评判结果^[13]这种合成运算较适用于单因素最优就算综合最优的情况^[13]

“ $\circ$ ”取为“ $> - \cdot$ ”或“ $\oplus - <$ ”,这称为主因素突出型,它与“ $> - <$ ”相近,但这两种合成运算都比“ $> - <$ ”精细,即由此得到的评判结果比由“ $> - <$ ”得到的“细腻”,它多少反映了非主要指标^[13]这两种合成运算均可用于“ $> - <$ ”失效的情形^[13]

“ $\circ$ ”取为“ $\oplus - \cdot$ ”称为加权平均型,它对所有因素依权重的大小均衡兼顾,比较适用于要求整体指标的情形^[13]

(3) 权重的分配要尽可能的合理^[13]现介绍一种继承法思想^[13]对某种评判对象的各因素的权重以前经验上有一分配方案,设为 A_1 ^[13]由于现在评判该对象时,时间和空间上的改变可能会有新的权重分配主案 A_2 ,而 A_1 是大量经验积累, A_2 具有较现实的合理性,因此,要兼顾 A_1 与 A_2 ,得出要采用的权重分配方案 A ,可如下确定

$$A=aA_1+(1-a)A_2, \quad a\in[0,1]$$

- 这种延袭以前权重分配方案的部分信息的方法称为确定权重的继承法⁽¹³⁾
- (4) 尽可能合理地确定单因素评判矩阵 R ⁽¹³⁾
 - (5) 对综合评判结果要作出合理的解释⁽¹³⁾
 - (6) 在复杂系统中,需要考虑的因素往往很多,而且因素间还有层次之分,这时若用综合评判模型 I,则必然会遇到这样的问题,一是权重难以较为合理地分配,二是因权向量的每个分量都要求较小,会出现“泯没”单因素评判矩阵的情况⁽¹³⁾为此,需用综合评判模型 II⁽¹³⁾以上算法都可设计成软件用计算机完成⁽¹³⁾
 - (7) 与综合评判正问题相反的是已知综合评判结果 B 和单因素评判矩阵 R ,求权向量 A ⁽¹³⁾称此为综合评判的逆问题⁽¹³⁾这归结为解模糊关系方程 $X \circ A=B$ ⁽¹³⁾

4 结 论

模糊集理论的提出尽管仅有二十多年,但已广泛的应用于各个学科,并不断取得引人瞩目的成绩,如果把确定隶属函数的标准,专家的经验等以模糊的表达式输入计算机,就能使计算机进行与该专家同样的操作,使对受流进行分析的同时能进行模糊推理,对接触网的悬挂形式进行最优的设计和评价⁽¹³⁾

参 考 文 献

- 1 汪培庄. 模糊集理论及其应用. 上海:上海科学技术出版社,1983
- 2 曹立白,赵印军. 高速接触网—受电弓系统模式. 接触网设计技术,1995
- 3 曹立白. 计算机模拟弓网动态受流质量. 接触网设计技术,1995
- 4 于万聚. 接触网设计及检测原理. 北京:中国铁道出版社,1991

The Research on the Synthetical Judging Method of Current-Receiving Quality of Overhead Contact

Mei Zhihong

(Electronic and Information Engineering Department)

Wang Bingrong

Deng Wenhua

(Electrical Engineering Department)

(Economy Management Department)

Abstract The judgment standard of receiving current is analyzed through the discussion of the real factors which affect high-speed receiving current. Based on the fuzzy theory, the synthetical judgment mathematical model of current-receiving quality of over-head contact is put forward. Then such three elements in the judgment process as system idea, fuzzy theory method and computer application are expounded.

Key words current-receiving quality; command of degree; Command of function; fuzzy theory